



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107314952 B

(45)授权公告日 2019.06.18

(21)申请号 201710563485.9

CN 102207441 A,2011.10.05,

(22)申请日 2017.07.12

US 2014291420 A1,2014.10.02,

US 8512855 B2,2013.08.20,

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 107314952 A

杨敏等.微纳通道中牛顿流体毛细流动的研究进展.《科学通报》.2016,第61卷(第14期),

(43)申请公布日 2017.11.03

王新平等.高分子表面动态行为与接触角

(73)专利权人 清华大学

地址 100084 北京市海淀区100084信箱82

分箱清华大学专利办公室

时间依赖性.《中国科学 B 辑 化学》.2015,第35卷(第1期),

M. Yang et al..Experimental study on capillary filling in nanochannels.

《Chemical Physics Letters》.2016,第662卷

(72)发明人 曹炳阳 杨敏

(74)专利代理机构 北京高沃律师事务所 11569

代理人 王戈

BingYang Cao et al..Nonequilibrium molecular dynamics simulation of shear

viscosity by a uniform momentum source-and-sink scheme.《Journal of Computational

Physics》.2012,第231卷

(51)Int.Cl.

G01N 13/02(2006.01)

审查员 李明净

(56)对比文件

CN 105547922 A,2016.05.04,

CN 106018184 A,2016.10.12,

权利要求书4页 说明书12页 附图4页

(54)发明名称

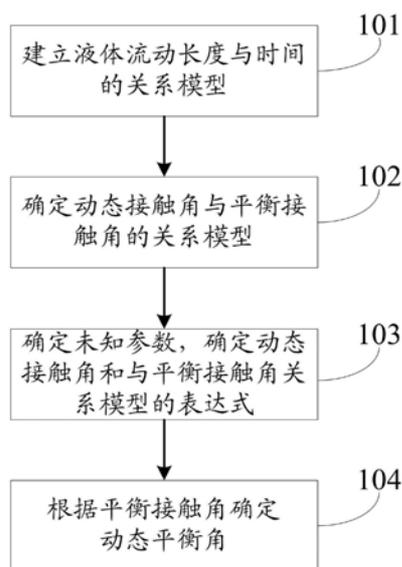
一种测量极低毛细数下动态接触角的方法及系统

(57)摘要

本发明公开一种测量极低毛细数下动态接触角的方法及系统。该方法包括：建立液体流动过程中流动长度与时间的关系模型；确定动态接触角与平衡接触角的关系模型

$$\cos\theta_d = \cos\theta_e \left(a + b \cdot \frac{\sigma \cos\theta_e}{\eta} \right)^2$$
；确定未知参数a

和b的值，从而确定关于参数平衡接触角的关系模型；根据液体的平衡接触角确定所述液体的动态接触角。采用本发明的方法或系统，实现了毛细数极低的系统中动态接触角的测量，而且所需液体量极少，避免浪费大量液体，并且操作简单、便于携带，测量迅速、结果可靠。



1. 一种测量极低毛细数下动态接触角的方法,其特征在于,所述方法包括:
建立液体流动过程中流动长度与时间的关系模型:

$$l(t) = \left(a + b \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right) \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} = \left(\frac{\sigma h \cos \theta_d}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t}, \text{其中 } l(t) \text{ 表示 } t \text{ 时刻液体的}$$

的流动距离, σ 表示液体表面张力, η 表示液体动力黏度, h 表示通道高度, θ_e 表示液体与通道壁间的平衡接触角, θ_d 表示液体与通道壁间的动态接触角, a 和 b 为与通道深度有关的未知参数;

$$\text{确定动态接触角与平衡接触角的关系模型: } \cos \theta_d = \cos \theta_e \left(a + b \cdot \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right)^2;$$

确定未知参数 a 和 b 的值,确定关于参数平衡接触角 θ_e 的关系模型

$$\cos \theta_d = \cos \theta_e \left(a + b \cdot \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right)^2; \text{所述确定未知参数 } a \text{ 和 } b \text{ 的值,具体包括:利用 } N \text{ 种已知}$$

液体对应进行 N 组实验, N 为大于 1 的整数;根据公式

$$l(t) = \left(a + b \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right) \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} = A_{\text{exp}} \sqrt{t} \text{ 获取 } N \text{ 组实验中的每组实验的拟合斜}$$

$$\text{率 } A_{\text{exp}}; \text{根据公式 } l(t) = \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} = A_{LW} \sqrt{t} \text{ 获取 } N \text{ 组实验中的每组实验的理论斜}$$

率 A_{LW} ;获取 N 组实验中的每组实验的拟合斜率和对应理论斜率的比值,得到:

$$\frac{A_{\text{exp}(k)}}{A_{LW(k)}} = a + b \frac{\sigma_{(k)} \cos \theta_{e(k)}}{\eta_{(k)}}; \text{其中 } A_{\text{exp}(k)} \text{ 表示第 } k \text{ 组实验得到的拟合斜率, } k = 1, 2, \dots$$

N , $A_{LW(k)}$ 表示第 k 组实验对应的理论斜率, $\sigma_{(k)}$ 表示第 k 组实验中液体表面张力, $\theta_{e(k)}$ 表示第 k 组实验中液体与通道壁间的平衡接触角, $\eta_{(k)}$ 表示第 k 组实验中液体动力黏度;根据所述 N 组

实验的已知液体的相关参数,获得每组实验已知液体对应的 $\frac{\sigma_{(k)} \cos \theta_{e(k)}}{\eta_{(k)}}$ 参数,其中所述

相关参数包括液体表面张力 $\sigma_{(k)}$ 、液体与通道壁间的平衡接触角 $\theta_{e(k)}$ 、液体动力黏度 $\eta_{(k)}$;确定所述 a 和 b 的值;

根据液体的平衡接触角 θ_e 确定所述液体的动态接触角 θ_d 。

2. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于,所述确定所述 a 和 b 的值之后,还包括:

获得 M 组不同深度的通道对应的液体流动过程中流动长度与时间的关系模型

$$l(t) = \left(a_{(i)} + b_{(i)} \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right) \left(\frac{\sigma h_{(i)} \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} \text{ 中的未知参数 } a_{(i)} \text{ 和 } b_{(i)} \text{ 的值,其中 } M \text{ 为大}$$

于1的整数, $a_{(i)}$ 和 $b_{(i)}$ 为与通道深度 $h_{(i)}$ 有关的未知参数, 通道深度 $h_{(i)}$ 为通道 i 的深度;

确定通道深度 h 与未知参数 a 、 b 之间的关系函数 $h=f(a, b)$ 以及未知参数 a 和 b 之间的关系函数 $a=g(b)$ 。

3. 一种测量极低毛细数下动态接触角的系统, 其特征在于, 所述系统包括:

流动长度与时间的关系模型建立模块, 用于建立液体流动过程中流动长度与时间的关系模型:

$$l(t) = \left(a + b \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right) \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} = \left(\frac{\sigma h \cos \theta_d}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t}, \text{ 其中 } l(t) \text{ 表示 } t$$

时刻液体的流动距离, σ 表示液体表面张力, η 表示液体动力黏度, h 表示通道高度, θ_e 表示液体与通道壁间的平衡接触角, θ_d 表示液体与通道壁间的动态接触角, a 和 b 为与通道深度有关的未知参数;

动态接触角与平衡接触角的关系模型确定模块, 用于确定动态接触角与平衡接触角的关系模型:

$$\cos \theta_d = \cos \theta_e \left(a + b \cdot \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right)^2;$$

未知参数确定模块, 用于确定未知参数 a 和 b 的值, 确定关于参数平衡接触角 θ_e 的关系模型

$$\cos \theta_d = \cos \theta_e \left(a + b \cdot \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right)^2; \text{ 所述未知参数确定模块, 具体包括: 实验控制单元, 用于利用 } N \text{ 种已知液体对应进行 } N \text{ 组实验, } N \text{ 为大于 } 1 \text{ 的整数; 拟合斜率获取模块, 用于根据公式 } l(t) = \left(a + b \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right) \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} = A_{\text{exp}} \sqrt{t} \text{ 获取 } N \text{ 组实验中的每组实验的}$$

$$\text{拟合斜率 } A_{\text{exp}}; \text{ 理论斜率获取单元, 用于根据公式 } l(t) = \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} = A_{LW} \sqrt{t} \text{ 获取 } N$$

$$\text{组实验中的每组实验的理论斜率 } A_{LW}; \text{ 比值计算单元, 用于计算 } N \text{ 组实验中的每组实验的拟合斜率和对理论斜率的比值, 得到: } \frac{A_{\text{exp}(k)}}{A_{LW(k)}} = a + b \frac{\sigma_{(k)} \cos \theta_{e(k)}}{\eta_{(k)}}; \text{ 其中 } A_{\text{exp}(k)} \text{ 表示第 } k \text{ 组}$$

$$\text{实验得到的拟合斜率, } k=1, 2, \dots, N, A_{LW(k)} \text{ 表示第 } k \text{ 组实验对应的理论斜率, } \sigma_{(k)} \text{ 表示第 } k \text{ 组实验中液体表面张力, } \theta_{e(k)} \text{ 表示第 } k \text{ 组实验中液体与通道壁间的平衡接触角, } \eta_{(k)} \text{ 表示第 } k \text{ 组实验中液体动力黏度; 液体参数计算单元, 用于根据所述 } N \text{ 组实验的已知液体的相关参数,}$$

获得每组实验已知液体对应的 $\frac{\sigma_{(k)} \cos \theta_{e(k)}}{\eta_{(k)}}$ 参数, 其中所述相关参数包括液体表面张力

$$\sigma_{(k)} \text{、液体与通道壁间的平衡接触角 } \theta_{e(k)} \text{、液体动力黏度 } \eta_{(k)}; \text{ 未知参数确定单元, 用于确定所述 } a \text{ 和 } b \text{ 的值;}$$

动态接触角确定模块, 用于根据液体的平衡接触角 θ_e 确定所述液体的动态接触角 θ_d 。

4. 根据权利要求3所述的系统, 其特征在于, 所述系统还包括:

不同深度通道对应的未知参数确定模块,用于确定所述a和b的值之后,获得M组不同深度的通道对应的液体流动过程中流动长度与时间的关系模型

$$l(t) = \left(a_{(i)} + b_{(i)} \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right) \left(\frac{\sigma h_{(i)} \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t}$$

中的未知参数 $a_{(i)}$ 和 $b_{(i)}$ 的值,其中M为大于1的整数, $a_{(i)}$ 和 $b_{(i)}$ 为与通道深度 $h_{(i)}$ 有关的未知参数,通道深度 $h_{(i)}$ 为通道i的深度;

关系函数确定模块,用于确定通道深度h与未知参数a、b之间的关系函数 $h=f(a,b)$ 以及未知参数a和b之间的关系函数 $a=g(b)$ 。

5.一种测量极低毛细数下动态接触角的装置,其特征在于,所述装置包括:电源、进样装置、微/纳米通道、温控装置、控制器、数据采集装置;

所述电源连接所述进样装置;所述进样装置的输出端与所述微/纳米通道的入口连接,所述微/纳米通道的出口直通大气;

所述控制器的第一输出端连接所述进样装置的输入端;所述控制器的第二输出端连接所述温控装置的输入端;所述微/纳米通道位于所述温控装置内部;

所述数据采集装置用于采集液体的流动距离和时间;

所述控制器的输入端连接所述数据采集装置,用于根据所述数据采集装置采集的液体距离和时间,利用液体的流动长度与时间的关系模型

$$l(t) = \left(a + b \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right) \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} = \left(\frac{\sigma h \cos \theta_d}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t}$$

确定未知参数a和b的值,

确定关于参数平衡接触角 θ_e 的关系模型 $\cos \theta_d = \cos \theta_e \left(a + b \cdot \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right)^2$,根据液体的

平衡接触角 θ_e 确定所述液体的动态接触角 θ_d ,其中 $l(t)$ 表示t时刻液体的流动距离, σ 表示液体表面张力, η 表示液体动力黏度, h 表示通道高度, θ_e 表示液体与通道壁间的平衡接触角, θ_d 表示液体与通道壁间的动态接触角,a和b为与通道深度有关的未知参数;所述确定未知参数a和b的值,具体包括:利用N种已知液体对应进行N组实验,N为大于1的整数;根据公式

$$l(t) = \left(a + b \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right) \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} = A_{\text{exp}} \sqrt{t}$$

获取N组实验中的每组实验的拟合斜

率 A_{exp} ;根据公式 $l(t) = \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} = A_{LW} \sqrt{t}$ 获取N组实验中的每组实验的理论斜

率 A_{LW} ;获取N组实验中的每组实验的拟合斜率和对应理论斜率的比值,得到:

$$\frac{A_{\text{exp}(k)}}{A_{LW(k)}} = a + b \frac{\sigma_{(k)} \cos \theta_{e(k)}}{\eta_{(k)}};$$

其中 $A_{\text{exp}(k)}$ 表示第k组实验得到的拟合斜率, $k=1,2,\dots$

N, $A_{LW(k)}$ 表示第k组实验对应的理论斜率, $\sigma_{(k)}$ 表示第k组实验中液体表面张力, $\theta_{e(k)}$ 表示第k组实验中液体与通道壁间的平衡接触角, $\eta_{(k)}$ 表示第k组实验中液体动力黏度;根据所述N组

实验的已知液体的相关参数,获得每组实验已知液体对应的 $\frac{\sigma_{(k)} \cos \theta_{e(k)}}{\eta_{(k)}}$ 参数,其中所述

相关参数包括液体表面张力 $\sigma_{(k)}$ 、液体与通道壁间的平衡接触角 $\theta_{e(k)}$ 、液体动力黏度 $\eta_{(k)}$;确定所述a和b的值。

6. 根据权利要求5所述的装置,其特征在于,所述数据采集装置具体包括:E组光电组件、计时电路、第一数据处理装置;其中E为大于2的整数;

每组光电组件包括一个光发射器和一个光接收器,所述E组光电组件的E个光发射器依次位于所述微/纳米通道的下方,所述E组光电组件的E个光接收器依次位于所述微/纳米通道的上方,与所述E个光发射器对应设置;

所述E组光电组件的E个光接收器与所述计时电路相连;

所述第一数据处理装置与所述计时电路的输出端连接,用于根据所述E组光电组件之间的距离和所述微/纳米通道中液体到达每一组光电组件的时间,获得液体的E组流动距离和时间。

7. 根据权利要求5所述的装置,其特征在于,所述数据采集装置具体包括:F个光源、F个光电传感器、第二数据处理装置;其中F为大于2的整数;

所述F个光源与所述F个光电传感器一一对应;所述F个光电传感器依次位于所述微/纳米通道的上方,所述F个光源依次位于所述微/纳米通道的下方,与所述F个光电传感器相对设置;

所述第二数据处理装置与所述F个光电传感器的输出端连接,用于根据所述F个光电传感器之间的距离和所述微/纳米通道中液体到达每一个光电传感器的时间,获得液体的F组流动距离和时间。

8. 根据权利要求5所述的装置,其特征在于,所述测量装置还包括:显示装置,所述显示装置的输入端连接所述控制器的第三输出端,用于显示所述控制器输出的液体动态接触角数据。

一种测量极低毛细数下动态接触角的方法及系统

技术领域

[0001] 本发明涉及液体测量领域,特别是涉及一种测量极低毛细数下动态接触角的方法及系统。

背景技术

[0002] 一种流体在固体表面上取代另外一种流体的动态过程称为润湿动力学,许多自然科学和工程技术均与润湿动力学问题相关,比如植物根毛区通过毛细作用吸收土壤中水分来维持生命体征,毛巾吸水,倒装芯片下填充工艺,石油二次开采,纺织品染色等。液-液界面张力、液-气表面张力以及固-液表面张力值等指标是表征润湿动力学的基本参数,而这些参数的不同最终带来接触角的不同,接触角是指在气、液、固三相交点处所作的气-液界面的切线穿过液体与固-液交界线之间的夹角,是润湿程度的量度,所以接触角变化情况可以最直接反映润湿动力学变化过程。

[0003] 目前测量接触角的常用方法可以通过液体实验实现对较高毛细数情况下的接触角变化情况进行测量,但是当毛细数变得极低时(通常毛细数低于 10^{-5} 时称为极低),由于液体量极低,很难通过常用的接触角测量方法得到相应动态接触角。由于加工技术的进步,人们已经可以得到深度为几纳米的毛细通道,利用这些毛细通道可以得到毛细数 $Ca \leq 10^{-5}$ 流动情形,但此时无法实现对接触角动态变化过程的可视化,导致利用常用的接触角测量方法无法准确得到动态接触角数据。

发明内容

[0004] 本发明的目的是提供一种测量极低毛细数下动态接触角的方法及系统,通过极少的液体量实现极低毛细数系统中动态接触角的测量,以提高测量的准确度。

[0005] 为实现上述目的,本发明提供了如下方案:

[0006] 一种测量极低毛细数下动态接触角的方法,所述方法包括:

[0007] 建立液体流动过程中流动长度与时间的关系模型:

$$l(t) = \left(a + b \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right) \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} = \left(\frac{\sigma h \cos \theta_d}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t}, \text{ 其中 } l(t) \text{ 表示 } t \text{ 时刻液体的流动距离, } \sigma \text{ 表示液体表面张力, } \eta \text{ 表示液体动力黏度, } h \text{ 表示通道高度, } \theta_e \text{ 表示液体与通道壁间的平衡接触角, } \theta_d \text{ 表示液体与通道壁间的动态接触角, } a \text{ 和 } b \text{ 为与通道深度有关的未知参数;}$$

[0008] 确定动态接触角与平衡接触角的关系模型: $\cos \theta_d = \cos \theta_e \left(a + b \cdot \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right)^2$;

[0009] 确定未知参数 a 和 b 的值,确定关于参数平衡接触角 θ_e 的关系模型

$$\cos \theta_d = \cos \theta_e \left(a + b \cdot \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right)^2;$$

[0010] 根据液体的平衡接触角 θ_e 确定所述液体的动态接触角 θ_d 。

[0011] 可选的,所述确定未知参数a和b的值,具体包括:

[0012] 利用N种已知液体对应进行N组实验,N为大于1的整数;

[0013] 根据公式 $l(t) = \left(a + b \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right) \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} = A_{\text{exp}} \sqrt{t}$ 获取N组实验中的每组实验的拟合斜率 A_{exp} ;

[0014] 根据公式 $l(t) = \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} = A_{LW} \sqrt{t}$ 获取N组实验中的每组实验的理论斜率 A_{LW} ;

[0015] 获取N组实验中的每组实验的拟合斜率和对应理论斜率的比值,得到:

$$\frac{A_{\text{exp}(k)}}{A_{LW(k)}} = a + b \frac{\sigma_{(k)} \cos \theta_{e(k)}}{\eta_{(k)}}; \text{其中 } A_{\text{exp}(k)} \text{ 表示第 } k \text{ 组实验得到的拟合斜率, } k=1, 2, \dots$$

N, $A_{LW(k)}$ 表示第k组实验对应的理论斜率, $\sigma_{(k)}$ 表示第k组实验中液体表面张力, $\theta_{e(k)}$ 表示第k组实验中液体与通道壁间的平衡接触角, $\eta_{(k)}$ 表示第k组实验中液体动力黏度;

[0016] 根据所述N组实验的已知液体的相关参数,获得每组实验已知液体对应的 $\frac{\sigma_{(k)} \cos \theta_{e(k)}}{\eta_{(k)}}$ 参数,其中所述相关参数包括液体表面张力 $\sigma_{(k)}$ 、液体与通道壁间的平衡接

触角 $\theta_{e(k)}$ 、液体动力黏度 $\eta_{(k)}$;

[0017] 确定所述a和b的值。

[0018] 可选的,所述确定所述a和b的值之后,还包括:

[0019] 获得M组不同深度的通道对应的液体流动过程中流动长度与时间的关系模型

$$l(t) = \left(a_{(i)} + b_{(i)} \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right) \left(\frac{\sigma h_{(i)} \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} \text{ 中的未知参数 } a_{(i)} \text{ 和 } b_{(i)} \text{ 的值,其中 } M \text{ 为大}$$

于1的整数, $a_{(i)}$ 和 $b_{(i)}$ 为与通道深度 $h_{(i)}$ 有关的未知参数,通道深度 $h_{(i)}$ 为通道i的深度;

[0020] 确定通道深度h与未知参数a、b之间的关系函数 $h=f(a, b)$ 以及未知参数a和b之间的关系函数 $a=g(b)$ 。

[0021] 一种测量极低毛细数下动态接触角的系统,所述系统包括:

[0022] 流动长度与时间的关系模型建立模块,用于建立液体流动过程中流动长度与时间的

$$\text{的关系模型: } l(t) = \left(a + b \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right) \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} = \left(\frac{\sigma h \cos \theta_d}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t}, \text{ 其中 } l(t) \text{ 表}$$

示t时刻液体的流动距离, σ 表示液体表面张力, η 表示液体动力黏度,h表示通道高度, θ_e 表示液体与通道壁间的平衡接触角, θ_d 表示液体与通道壁间的动态接触角,a和b为与通道深度有关的未知参数;

[0023] 动态接触角与平衡接触角的关系模型确定模块,用于确定动态接触角与平衡接触

$$\text{角的关系模型: } \cos \theta_d = \cos \theta_e \left(a + b \cdot \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right)^2;$$

[0024] 未知参数确定模块,用于确定未知参数a和b的值,确定关于参数平衡接触角 θ_e 的

$$\text{关系模型 } \cos \theta_d = \cos \theta_e \left(a + b \cdot \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right)^2;$$

[0025] 动态接触角确定模块,用于根据液体的平衡接触角 θ_e 确定所述液体的动态接触角 θ_d 。

[0026] 可选的,所述未知参数确定模块,具体包括:

[0027] 实验控制单元,用于利用N种已知液体对应进行N组实验;

[0028] 拟合斜率获取模块,用于根据公式

$$l(t) = \left(a + b \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right) \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} = A_{\text{exp}} \sqrt{t} \text{ 获取N组实验中的每组实验的拟合斜率 } A_{\text{exp}};$$

[0029] 理论斜率获取单元,用于根据公式 $l(t) = \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} = A_{LW} \sqrt{t}$ 获取N组实

验中的每组实验的理论斜率 A_{LW} ;

[0030] 比值计算单元,用于计算N组实验中的每组实验的拟合斜率和对应理论斜率的比

$$\text{值,得到: } \frac{A_{\text{exp}(k)}}{A_{LW}(k)} = a + b \frac{\sigma(k) \cos \theta_{e(k)}}{\eta(k)}; \text{ 其中 } A_{\text{exp}(k)} \text{ 表示第k组实验得到的拟合斜率, } k =$$

1, 2, \dots, N, $A_{LW}(k)$ 表示第k组实验对应的理论斜率, $\sigma(k)$ 表示第k组实验中液体表面张力, $\theta_{e(k)}$ 表示第k组实验中液体与通道壁间的平衡接触角, $\eta(k)$ 表示第k组实验中液体动力黏度;

[0031] 液体参数计算单元,用于根据所述N组实验的已知液体的相关参数,获得每组实验

$$\text{已知液体对应的 } \frac{\sigma(k) \cos \theta_{e(k)}}{\eta(k)} \text{ 参数,其中所述相关参数包括液体表面张力 } \sigma(k) \text{、液体与通}$$

道壁间的平衡接触角 $\theta_{e(k)}$ 、液体动力黏度 $\eta(k)$;

[0032] 未知参数确定单元,用于确定所述a和b的值。

[0033] 可选的,所述系统还包括:

[0034] 不同深度通道对应的未知参数确定模块,用于确定所述a和b的值之后,获得M组不同深度的通道对应的液体流动过程中流动长度与时间的关系模型

$$l(t) = \left(a_{(i)} + b_{(i)} \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right) \left(\frac{\sigma h_{(i)} \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t}$$

中的未知参数 $a_{(i)}$ 和 $b_{(i)}$ 的值,其中 $a_{(i)}$ 和

$b_{(i)}$ 为与通道深度 $h_{(i)}$ 有关的未知参数,通道深度 $h_{(i)}$ 为通道 i 的深度;

[0035] 关系函数确定模块,用于确定通道深度 h 与未知参数 a 、 b 之间的关系函数 $h=f(a, b)$ 以及未知参数 a 和 b 之间的关系函数 $a=g(b)$ 。

[0036] 一种测量极低毛细数下动态接触角的装置,所述装置包括:电源、进样装置、微/纳米通道、温控装置、控制器、数据采集装置;

[0037] 所述电源连接所述进样装置;所述进样装置的输出端与所述微/纳米通道的入口连接,所述微/纳米通道的出口直通大气;

[0038] 所述控制器的第一输出端连接所述进样装置的输入端;所述控制器的第二输出端连接所述温控装置的输入端;所述微/纳米通道位于所述温控装置内部;

[0039] 所述数据采集装置用于采集液体的流动距离和时间;

[0040] 所述控制器的输入端连接所述数据采集装置,用于根据所述数据采集装置采集的液体距离和时间,利用液体的流动长度与时间的关系模型

$$l(t) = \left(a + b \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right) \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} = \left(\frac{\sigma h \cos \theta_d}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t}$$

确定未知参数 a 和 b 的值,

确定关于参数平衡接触角 θ_e 的关系模型 $\cos \theta_d = \cos \theta_e \left(a + b \cdot \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right)^2$,根据液体的

平衡接触角 θ_e 确定所述液体的动态接触角 θ_d ,其中 $l(t)$ 表示 t 时刻液体的流动距离, σ 表示液体表面张力, η 表示液体动力黏度, h 表示通道高度, θ_e 表示液体与通道壁间的平衡接触角, θ_d 表示液体与通道壁间的动态接触角, a 和 b 为与通道深度有关的未知参数。

[0041] 可选的,所述数据采集装置具体包括: E 组光电组件、计时电路、第一数据处理装置;其中 E 为大于2的整数;

[0042] 每组光电组件包括一个光发射器和一个光接收器,所述 E 组光电组件的 E 个光发射器依次位于所述微/纳米通道的下方,所述 E 组光电组件的 E 个光接收器依次位于所述微/纳米通道的上方,与所述 E 个光发射器对应设置;

[0043] 所述 E 组光电组件的 E 个光接收器与所述计时电路相连;

[0044] 所述第一数据处理装置与所述计时电路的输出端连接,用于根据所述 E 组光电组件之间的距离和所述微/纳米通道中液体到达每一组光电组件的时间,获得液体的 E 组流动距离和时间。

[0045] 可选的,所述数据采集装置具体包括: F 个光源、 F 个光电传感器、第二数据处理装置;其中 F 为大于2的整数;

[0046] 所述 F 个光源与所述 F 个光电传感器一一对应;所述 F 个光电传感器依次位于所述微/纳米通道的上方,所述 F 个光源依次位于所述微/纳米通道的下方,与所述 F 个光电传感器相对设置;

[0047] 所述第二数据处理装置与所述 F 个光电传感器的输出端连接,用于根据所述 F 个光

电传感器之间的距离和所述微/纳米通道中液体到达每一个光电传感器的时间,获得液体的F组流动距离和时间。

[0048] 可选的,所述测量装置还包括:显示装置,所述显示装置的输入端连接所述控制器的第三输出端,用于显示所述控制器输出的液体动态接触角数据。

[0049] 根据本发明提供的具体实施例,本发明公开了以下技术效果:

[0050] 本发明动态接触角测量方法利用微/纳通道中液体流动距离与时间的关系,确定动态接触角与平衡接触角的关系模型,进而通过平衡接触角可以直接确定动态接触角,实现了毛细数极低的系统中动态接触角的测量,而且所需液体量极少,避免浪费大量液体。本发明的接触角测量装置将深度为微/纳米量级的通道作为毛细管来减少实验液体的使用,液体在毛细压力驱动下流入微/纳米通道,不需要外部加压装置,不需要压力测量部件;操作简单、便于携带,测量迅速、结果可靠。

附图说明

[0051] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动性的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0052] 图1为本发明测量极低毛细数下动态接触角的方法流程图;

[0053] 图2为本发明测量极低毛细数下动态接触角的系统结构图;

[0054] 图3为本发明测量极低毛细数下动态接触角的装置结构图;

[0055] 图4为数据采集装置实施方式一的结构图;

[0056] 图5为数据采集装置实施方式二的结构图。

具体实施方式

[0057] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0058] 为使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂,下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细的说明。

[0059] 图1为本发明测量极低毛细数下动态接触角的方法流程图。如图1所示,所述方法包括:

[0060] 步骤101:建立液体流动长度与时间的关系模型。

[0061] 建立液体流动过程中流动长度与时间的关系模型:

$$l(t) = \left(a + b \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right) \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} = \left(\frac{\sigma h \cos \theta_d}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t}, \text{ 其中 } l(t) \text{ 表示 } t \text{ 时刻液体}$$

的流动距离, σ 表示液体表面张力, η 表示液体动力黏度, h 表示通道高度, θ_e 表示液体与通道壁间的平衡接触角, θ_d 表示液体与通道壁间的动态接触角, a 和 b 为与通道深度有关的未知

参数。

[0062] 步骤102:确定动态接触角与平衡接触角的关系模型。

[0063] 根据步骤101的关系模型,可以推导出动态接触角与平衡接触角的关系模型为:

$$\cos \theta_d = \cos \theta_e \left(a + b \cdot \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right)^2。$$

[0064] 步骤103:确定未知参数,确定动态接触角与平衡接触角关系模型的表达式。

[0065] 确定关系模型中的未知参数a和b的值,便可确定动态接触角与平衡接触角的关系模型。具体确定未知参数的过程为:

[0066] 利用N种已知液体对应进行N组实验,N为大于1的整数;

[0067] 根据公式 $l(t) = \left(a + b \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right) \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} = A_{\text{exp}} \sqrt{t}$ 获取N组实验中的每组实验的拟合斜率 A_{exp} ;

[0068] 根据公式 $l(t) = \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} = A_{LW} \sqrt{t}$ 获取N组实验中的每组实验的理论斜率 A_{LW} ;

[0069] 获取N组实验中的每组实验的拟合斜率和对应理论斜率的比值,得到:

$$\frac{A_{\text{exp}(k)}}{A_{LW(k)}} = a + b \frac{\sigma_{(k)} \cos \theta_{e(k)}}{\eta_{(k)}}; \text{其中 } A_{\text{exp}(k)} \text{ 表示第 } k \text{ 组实验得到的拟合斜率, } k=1, 2, \dots$$

N, $A_{LW(k)}$ 表示第k组实验对应的理论斜率, $\sigma_{(k)}$ 表示第k组实验中液体表面张力, $\theta_{e(k)}$ 表示第k组实验中液体与通道壁间的平衡接触角, $\eta_{(k)}$ 表示第k组实验中液体动力黏度;

[0070] 根据所述N组实验的已知液体的相关参数,获得每组实验已知液体对应的 $\frac{\sigma_{(k)} \cos \theta_{e(k)}}{\eta_{(k)}}$ 参数,其中所述相关参数包括液体表面张力 $\sigma_{(k)}$ 、液体与通道壁间的平衡接

触角 $\theta_{e(k)}$ 、液体动力黏度 $\eta_{(k)}$;

[0071] 确定所述a和b的值。

[0072] 此过程为利用已知液体的各个已知参数(包括液体的平衡接触角为已知)进行实验,从而确定模型未知参数a和b,确定模型 $\cos \theta_d = \cos \theta_e \left(a + b \cdot \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right)^2$ 的表达式,

进而可以在已知液体平衡接触角的情况下,利用该模型确定液体的动力接触角。

[0073] 由于a和b为与通道相关的参数,因此,通道参数不变的情况下参数a和b的值是不变的,也就是对应的动态接触角与平衡接触角的关系模型

$\cos \theta_d = \cos \theta_e \left(a + b \cdot \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right)^2$ 是固定的。此确定参数a和b值的方法更适用于通道数

量少甚至只有一个时,通过液体实验得到参数a和b值,比较快捷。

[0074] 当通道参数发生变化时(通道高度h发生变化),则参数a和b发生变化,关系模型

$$\cos \theta_d = \cos \theta_e \left(a + b \cdot \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right)^2$$

也由于参数a和b的变化而变化。因此,对于通道变化的

情况,可以通过几组实验得出通道高度h与参数a和b的关系,那么在通道高度已知的情况下,无需再通过多组已知液体进行实验来确定参数a和b的值,可以直接根据通道高度h与参数a和b的关系确定参数a和b的值,对应的模型则很容易确定。具体的确定通道高度h与参数a和b的关系的过程为:

[0075] 获得M组不同深度的通道对应的液体流动过程中流动长度与时间的关系模型

$$l(t) = \left(a_{(i)} + b_{(i)} \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right) \left(\frac{\sigma h_{(i)} \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t}$$

中的未知参数 $a_{(i)}$ 和 $b_{(i)}$ 的值,其中M为大

于1的整数, $a_{(i)}$ 和 $b_{(i)}$ 为与通道深度 $h_{(i)}$ 有关的未知参数,通道深度 $h_{(i)}$ 为通道i的深度;

[0076] 确定通道深度h与未知参数a、b之间的关系函数 $h=f(a,b)$ 以及未知参数a和b之间的关系函数 $a=g(b)$ 。

[0077] 此确定参数a和b值的方法更适用于通道数量较多时,此时对每一通道进行液体实验确定参数a和b值需要耗费大量的时间和液体,效率较低,因此,通过有限个通道的液体实验确定参数a和b值之后,确定通道深度与参数a和b的关系函数,可以直接根据通道深度确定参数a和b的值,从而直接确定关系模型,可以大大节约时间,避免浪费,同时提高模型确定的效率。

[0078] 步骤104:根据平衡接触角确定动态接触角。

[0079] 根据平衡接触角与动态接触角的关系模型 $\cos \theta_d = \cos \theta_e \left(a + b \cdot \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right)^2$,

在固体壁面和液体确定的情况下,平衡接触角是确定的,那么利用该模型,根据液体的平衡接触角 θ_e 可以直接确定液体的动态接触角 θ_d 。

[0080] 对于微/纳米通道,可以忽略惯性力项及重力项的影响,且在微/纳米通道中通道深度远小于通道宽度(即 $h \ll w$),因此根据牛顿动力学公式

$$\rho \left[l(t) l''(t) + (l'(t))^2 \right] = \frac{2(h+w)}{hw} \sigma \cos \theta_e - \frac{12(h+w)}{h^2 w} \eta l(t) l''(t) - \rho g l(t)$$

其中 $l(t)$ 表

示t时刻液体的流动距离, $l'(t)$ 表示 $l(t)$ 的一阶导数, $l''(t)$ 表示 $l(t)$ 的二阶导数, ρ 表示液体密度, σ 表示液体表面张力, θ_e 表示液体与通道壁间的平衡接触角, η 表示液体动力黏度, h 表示通道高度, w 表示通道宽度, g 表示重力加速度。从而推导出液体流动长度与时间的理论

关系式为: $l(t) = \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} = A_{LW} \sqrt{t}$,其中 A_{LW} 为理论斜率,

$A_{LW} = \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2}$; 也就是当液体确定时,其相关的各个参数是确定的,利用理论关

系式便可得到理论上的流动长度与时间的关系,此理论关系式是目前预测毛细流动过程的宏观理论模型,即为LW模型。对于某一深度h的通道,如果液体表面张力 σ 、液体与通道壁间的平衡接触角 θ_e 、液体动力黏度 η 在液体流动过程中保持不变,那么流动距离 $l(t)$ 与 \sqrt{t} 成线性关系,也就是说, A_{LW} 是常数。观察该模型,如果知道了通道深度h,以及的相关参数(液体表面张力 σ 、液体与通道壁间的平衡接触角 θ_e 、液体动力黏度 η),就可以利用该模型预测液体在微/纳米通道中的速度。基于该模型,大量学者进行了实验研究,主要得到了以下三点结论:1.定性分析结果表明,目前微/纳米通道中毛细流动过程的流动趋势可以用已有宏观理论模型进行预测,即流动时流动距离 $l(t)$ 与 \sqrt{t} 成线性关系;2.定量分析结果表明,目前的宏观理论预测模型不能很好的解释实验现象,实验中液体的流动速度普遍低于理论预测值,即实验结果的拟合斜率(A_{exp}) < 理论斜率(A_{LW});3.并不能确定到底是什么原因导致了实验值与理论值之间的偏差。这也就是说,目前的宏观理论模型无法准确预测微/纳米通道中的毛细流动过程,也就无法准确地预测动态接触角。因此,在实际应用时,需要基于理论关系式,建立新的模型,即本发明建立的新的模型,基于本发明建立的模型,可以准确地测量液体的动态接触角。此处的动态接触角中的动态是指由于微/纳米通道的变化(例如通道高度变化)或者由于流动流体本身的变化(例如液体种类变化),使液体流动过程中接触角发生的变化。

[0081] 图2为本发明测量极低毛细数下动态接触角的系统结构图。如图2所示,所述系统包括:

[0082] 流动长度与时间的关系模型建立模块201,用于建立液体流动过程中流动长度与

时间的关系模型: $l(t) = \left(a + b \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right) \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} = \left(\frac{\sigma h \cos \theta_d}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t}$, 其中 l

(t)表示t时刻液体的流动距离, σ 表示液体表面张力, η 表示液体动力黏度,h表示通道高度, θ_e 表示液体与通道壁间的平衡接触角, θ_d 表示液体与通道壁间的动态接触角,a和b为与通道深度有关的未知参数;

[0083] 动态接触角与平衡接触角的关系模型确定模块202,用于确定动态接触角与平衡

接触角的关系模型: $\cos \theta_d = \cos \theta_e \left(a + b \cdot \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right)^2$;

[0084] 未知参数确定模块203,用于确定未知参数a和b的值,确定关于参数平衡接触角 θ_e

的关系模型 $\cos \theta_d = \cos \theta_e \left(a + b \cdot \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right)^2$;

[0085] 未知参数确定模块203,具体包括:

[0086] 实验控制单元,用于利用N种已知液体对应进行N组实验,N为大于1的整数;

[0087] 拟合斜率获取单元,用于根据公式

$l(t) = \left(a + b \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right) \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} = A_{\text{exp}} \sqrt{t}$ 获取N组实验中的每组实验的拟合斜率 A_{exp} ;

[0088] 理论斜率获取单元,用于根据公式 $l(t) = \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} = A_{LW} \sqrt{t}$ 获取N组实验中的每组实验的理论斜率 A_{LW} ;

[0089] 比值计算单元,用于计算N组实验中的每组实验的拟合斜率和对应理论斜率的比值,得到: $\frac{A_{\text{exp}(k)}}{A_{LW}(k)} = a + b \frac{\sigma(k) \cos \theta_{e(k)}}{\eta(k)}$; 其中 $A_{\text{exp}(k)}$ 表示第k组实验得到的拟合斜率, $k=1, 2, \dots, N$, $A_{LW}(k)$ 表示第k组实验对应的理论斜率, $\sigma(k)$ 表示第k组实验中液体表面张力, $\theta_{e(k)}$ 表示第k组实验中液体与通道壁间的平衡接触角, $\eta(k)$ 表示第k组实验中液体动力黏度;

[0090] 液体参数计算单元,用于根据所述N组实验的已知液体的相关参数,获得每组实验已知液体对应的 $\frac{\sigma(k) \cos \theta_{e(k)}}{\eta(k)}$ 参数,其中所述相关参数包括液体表面张力 $\sigma(k)$ 、液体与通道壁间的平衡接触角 $\theta_{e(k)}$ 、液体动力黏度 $\eta(k)$;

[0091] 未知参数确定单元,用于确定所述a和b的值。

[0092] 动态接触角确定模块204,用于根据液体的平衡接触角 θ_e 确定所述液体的动态接触角 θ_d 。

[0093] 此外,系统还包括:不同深度通道对应的未知参数确定模块,用于确定所述a和b的值之后,获得M组不同深度的通道对应的液体流动过程中流动长度与时间的关系模型

$l(t) = \left(a_{(i)} + b_{(i)} \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right) \left(\frac{\sigma h_{(i)} \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t}$ 中的未知参数 $a_{(i)}$ 和 $b_{(i)}$ 的值,其中M为大于1的整数, $a_{(i)}$ 和 $b_{(i)}$ 为与通道深度 $h_{(i)}$ 有关的未知参数,通道深度 $h_{(i)}$ 为通道i的深度;

[0094] 关系函数确定模块,用于确定通道深度h与未知参数a、b之间的关系函数 $h=f(a, b)$ 以及未知参数a和b之间的关系函数 $a=g(b)$ 。

[0095] 图3为本发明测量极低毛细数下动态接触角的装置结构图。如图3所示,所述测量装置包括:电源301、进样装置302、微/纳米通道303、温控装置304、控制器305、数据采集装置306。

[0096] 电源301连接进样装置302;

[0097] 进样装置302的输出端与微/纳米通道303的入口连接,微/纳米通道303的出口直通大气;控制器305的第一输出端连接进样装置302的输入端;进样装置302是一个开放的系统,可以选择人工手动进样,也可以选择通过控制器305控制进样装置实现自动进样。

[0098] 控制器305的第二输出端连接温控装置304的输入端;微/纳米通道303位于温控装置内部;温控装置304用于根据控制器305的指令控制微/纳米通道303的温度,从而控制内

部液体的温度。由于微/纳米通道303尺寸小,因此需要的液体量极少,当如此少量的液体进入微/纳米通道303时,液体与通道壁面充分接触换热,液体温度会瞬接近通道壁面温度,可近似认为液体温度等于壁面温度,可以达到控制液体温度的目的。

[0099] 数据采集装置306用于采集液体的流动距离和时间;数据采集装置306可以采用两种结构:

[0100] (1)图4为数据采集装置实施方式一的结构图,如图4所示,数据采集装置包括:E组光电组件401,E为大于2的整数(图中依次并列的第一光电组件10、第二光电组件11、第三光电组件12、第四光电组件13、第五光电组件14、第六光电组件15)、计时电路402、第一数据处理装置403;每组光电组件401包括一个光发射器4011和一个光接收器4012,所述E组光电组件401的E个光发射器依次位于微/纳米通道404的下方,所述E组光电组件401的E个光接收器4012依次位于所述微/纳米通道的上方,与所述E个光发射器对应设置;所述E组光电组件401的E个光接收器4012与所述计时电路402相连;所述第一数据处理装置403与所述计时电路402的输出端连接,用于根据所述E组光电组件401之间的距离和所述微/纳米通道404中液体到达每一组光电组件的时间,获得液体的E组流动距离和时间。具体实施时,相邻两组光电组件可以设置相距 $1\mu\text{m}$ — $100\mu\text{m}$ 。在测量过程中,液体在毛细力作用下流过微/纳米通道404,当第一组光电组件10检测到微/纳米通道404中的液体端面经过时,计时电路402记录下时间,同理,第二光电组件11、第三光电组件12、第四光电组件13、第五光电组件14、第六光电组件15分别在液体端面经过时计时电路402记录下时间,数据最终传输到第一数据处理装置403中,第一数据处理装置403根据记录时间与光电组件401之间的距离,获得液体的多组流动距离和时间。

[0101] (2)图5为数据采集装置实施方式二的结构图。如图5所示,数据采集装置包括:F个光源501、F个光电传感器502(可以采用光电管)、第二数据处理装置503;F为大于2的整数,F个光源501与所述F个光电传感器502一一对应;所述F个光电传感器502依次位于微/纳米通道504的上方,F个光源501依次位于所述微/纳米通道504的下方,与所述F个光电传感器502相对设置;第二数据处理装置503与所述F个光电传感器502的输出端连接,用于根据所述F个光电传感器502之间的距离和所述微/纳米通道504中液体到达每一个光电传感器的时间,获得液体的F组流动距离和时间。测量时,LED光源501发光,当液体流过时,挡住了光,光电管502接收不到光信号而发生变化,系统将这种光信号转变为电信号并记录,也就是自动记录液体流过的时刻。

[0102] 控制器305的输入端连接数据采集装置306,用于根据数据采集装置306采集的液体距离和时间,利用液体的流动长度与时间的关系模型

$$l(t) = \left(a + b \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right) \left(\frac{\sigma h \cos \theta_e}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} = \left(\frac{\sigma h \cos \theta_d}{3\eta} \right)^{1/2} \sqrt{t} \quad \text{确定未知参数a和b的值,}$$

确定关于参数平衡接触角 θ_e 的关系模型 $\cos \theta_d = \cos \theta_e \left(a + b \cdot \frac{\sigma \cos \theta_e}{\eta} \right)^2$, 根据液体的

平衡接触角 θ_e 确定液体的动态接触角 θ_d ,其中 $l(t)$ 表示t时刻液体的流动距离, σ 表示液体表面张力, η 表示液体动力黏度, h 表示通道高度, θ_e 表示液体与通道壁间的平衡接触角, θ_d 表示

液体与通道壁间的动态接触角, a 和 b 为与通道深度有关的未知参数。

[0103] 测量装置还包括显示装置307,显示装置307的输入端连接控制器305的第三输出端,用于显示控制器305输出的液体动态接触角数据。

[0104] 为提高测量效率,微/纳米通道303包括多个不同深度的通道,通道深度至少有5种;为避免感染,微/纳米通道303中的通道均为为一次性使用;为提高准确度,微/纳米通道为长直型。将深度为微/纳米量级的通道作为毛细管来减少实验液体的使用,通过毛细压力驱动液体流动,省去压差测量系统。深度为微/纳米量级的微/纳米通道所需液体量极少,可以小于 $1\mu\text{l}$;微/纳米通道为一次性使用,避免感染,不需要清洗装置,而且通道加工技术成熟;装置简单,液体在毛细压力驱动下流入微/纳米通道,不需要外部加压装置,不需要压力测量部件;操作简单、便于携带,测量迅速、结果可靠。

[0105] 整个测量装置的测量过程为:

[0106] 对于已知深度 h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 、 h_5 的微/通道303而言,首先将进样装置302中的微量注射泵取下,吸取1种简单牛顿流体(比如去离子水),之后将微量注射泵放入进样装置302;

[0107] 打开电源301和控制器305,开启温控装置304,待其稳定工作,进样装置302将该牛顿流体送到微/纳米通道303入口处,液体在毛细力作用下流入微/纳米通道303中的一个单通道,数据采集装置306对不同时刻液体的距离进行测量,以图4所示的数据采集装置为例,过程如下:液体端面经过光电组件10时,计时电路402记录下该时刻 t_1 ,同理,光电组件11、12、13、14、15分别记录液体端面流过时的时刻 t_2 、 t_3 、 t_4 、 t_5 、 t_6 ,所有数据均传输到第一数据处理装置403中,第一数据处理装置403根据光电组件之间的距离及时刻 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 、 t_5 、 t_6 ,得到6组流动距离 l 与时间 t 的数据;

[0108] 控制器305接收数据采集装置306中第一数据处理装置403传输的采集数据(6组流动距离 l 与时间 t 的数据),拟合得到并记录下该组实验数据的实验斜率 $A_{\text{exp}1}$ 、 $A_{\text{exp}2}$ 、 $A_{\text{exp}3}$ 、 $A_{\text{exp}4}$ 、 $A_{\text{exp}5}$;

[0109] 同理,接着使用其他牛顿流体(比如异丙醇、乙醇、70%甘油、30%甘油等)开展类似实验,分别得到每次试验的斜率 A_{exp} ,控制器305会根据记录的每种深度通道(例如包括5个通道,则对应5种通道深度)中的液体(液体至少也要用5种)实验的 $A_{\text{exp}}/A_{\text{LW}}$ 与 $(\sigma \cdot \cos\theta_e/\eta)$ 值,每一种深度通道对应的实验数据作为一组数据,在直角坐标系中画出 $A_{\text{exp}}/A_{\text{LW}}$ 与 $(\sigma \cdot$

$\cos\theta_e/\eta)$ 关系图,从而依据公式
$$\frac{A_{\text{exp}(k)}}{A_{\text{LW}(k)}} = a + b \frac{\sigma(k) \cos\theta_{e(k)}}{\eta(k)}$$
得到该深度通道的 a 、 b 值。

依次得到的5组 a 、 b 值,拟合得到 a 、 b 值与通道深度之间的关系,以及 a 、 b 值之间的关系,我们可以得到 $h=f(a,b)$ 以及 $a=f(b)$,也就是说,对于任意已知深度为 h 的通道(深度为微/纳米量级),就可以根据已知的 $h=f(a,b)$ 和 $a=f(b)$,直接计算得到该深度通道对应的 a 、 b 值,从而

确定该深度通道对应的模型
$$\cos\theta_d = \cos\theta_e \left(a + b \cdot \frac{\sigma \cos\theta_e}{\eta} \right)^2;$$

[0110] 结合液体的粘度以及该液体的静态接触角 θ_e ,利用上式就可以得到该液体在该深度通道中的动态接触角值;

[0111] 显示装置307实时显示测得的动态接触角的值。

[0112] 本说明书中各个实施例采用递进的方式描述,每个实施例重点说明的都是与其他实施例的不同之处,各个实施例之间相同相似部分互相参见即可。对于实施例公开的系统而言,由于其与实施例公开的方法相对应,所以描述的比较简单,相关之处参见方法部分说明即可。

[0113] 本文中应用了具体个例对本发明的原理及实施方式进行了阐述,以上实施例的说明只是用于帮助理解本发明的方法及其核心思想;同时,对于本领域的一般技术人员,依据本发明的思想,在具体实施方式及应用范围上均会有改变之处。综上所述,本说明书内容不应理解为对本发明的限制。

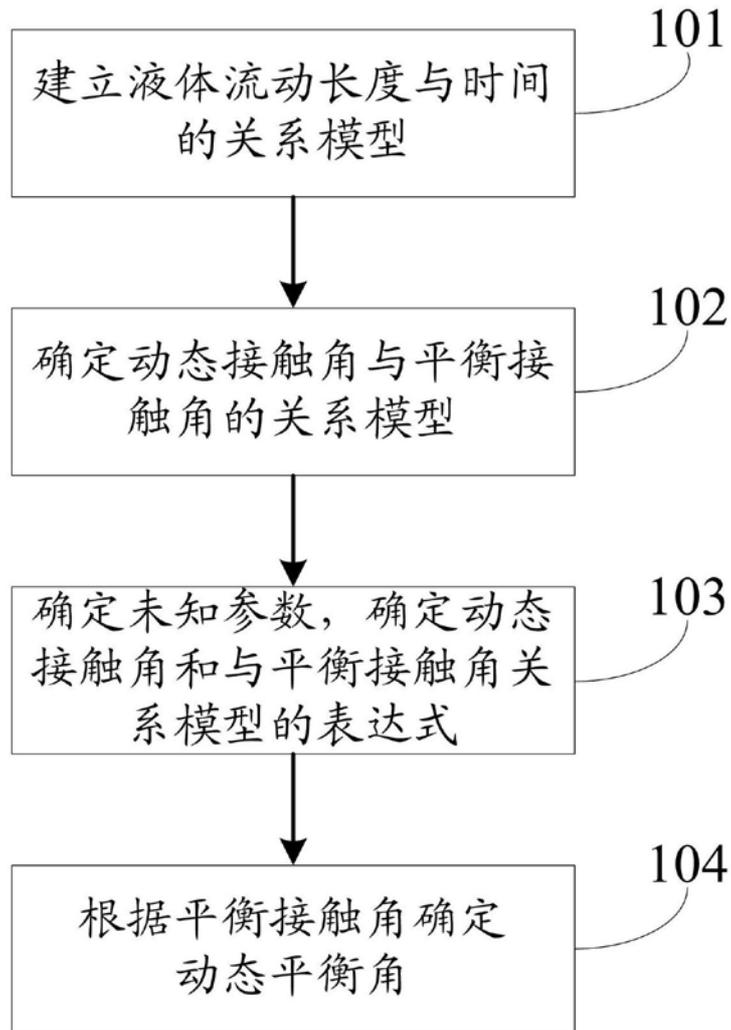


图1

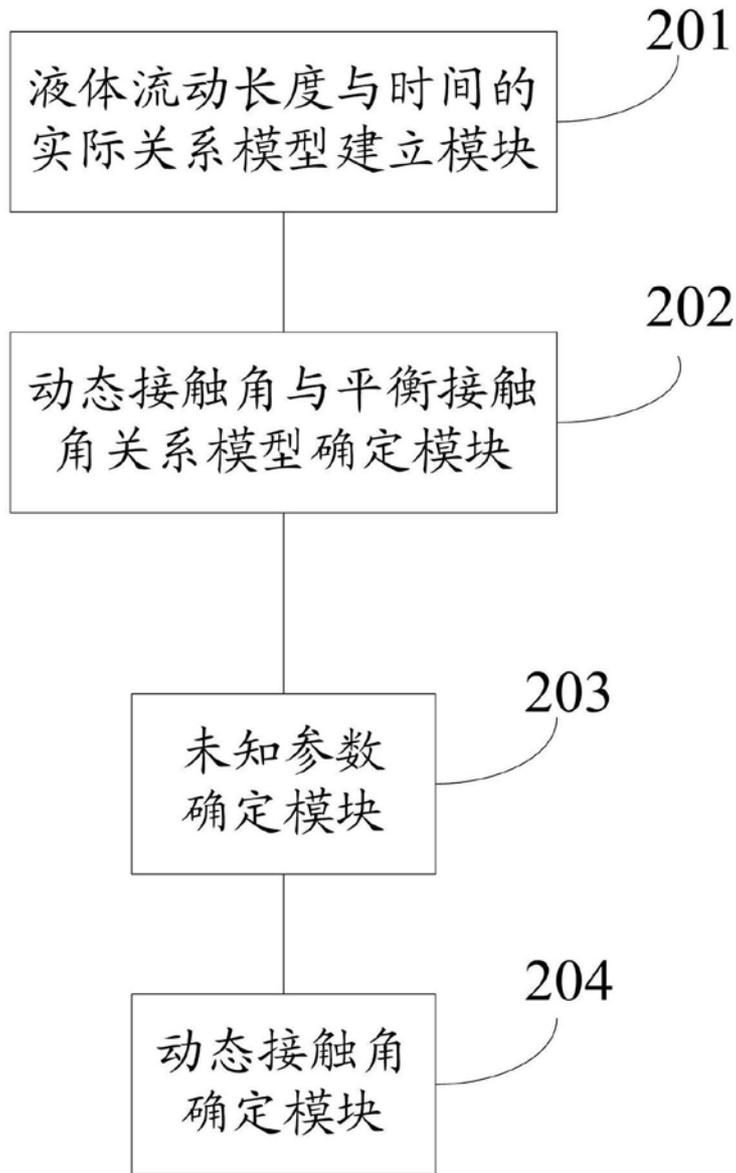


图2

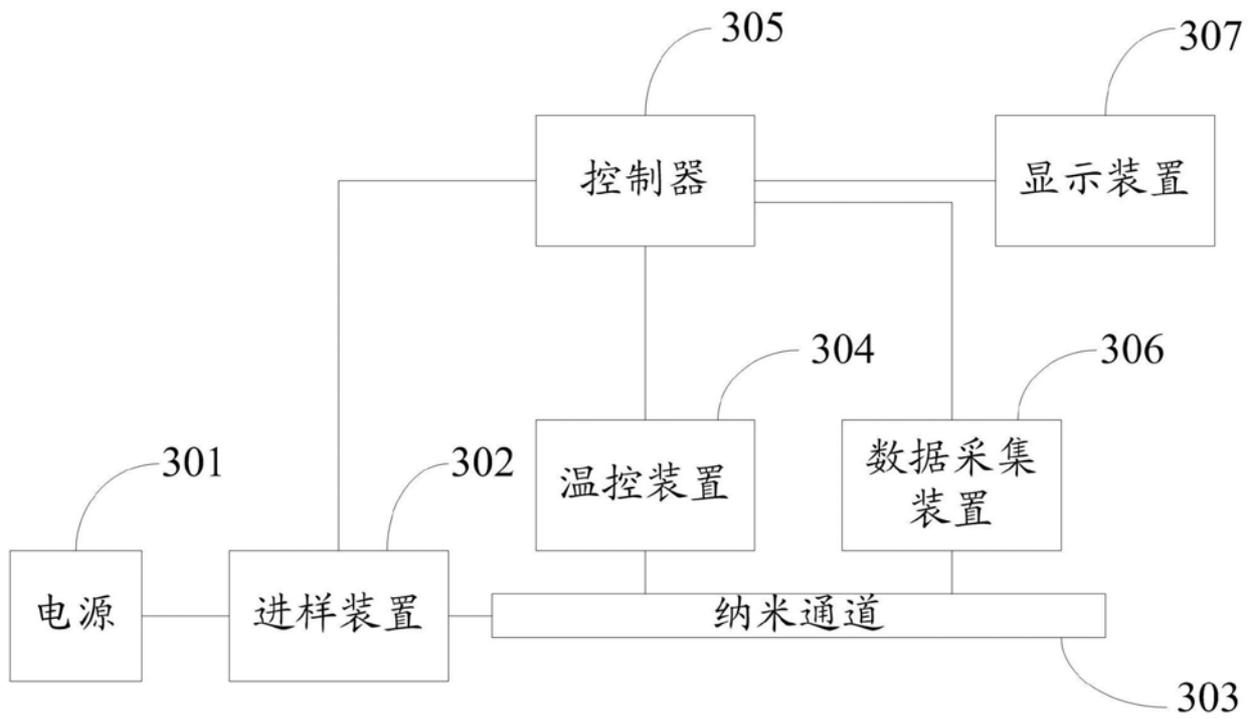


图3

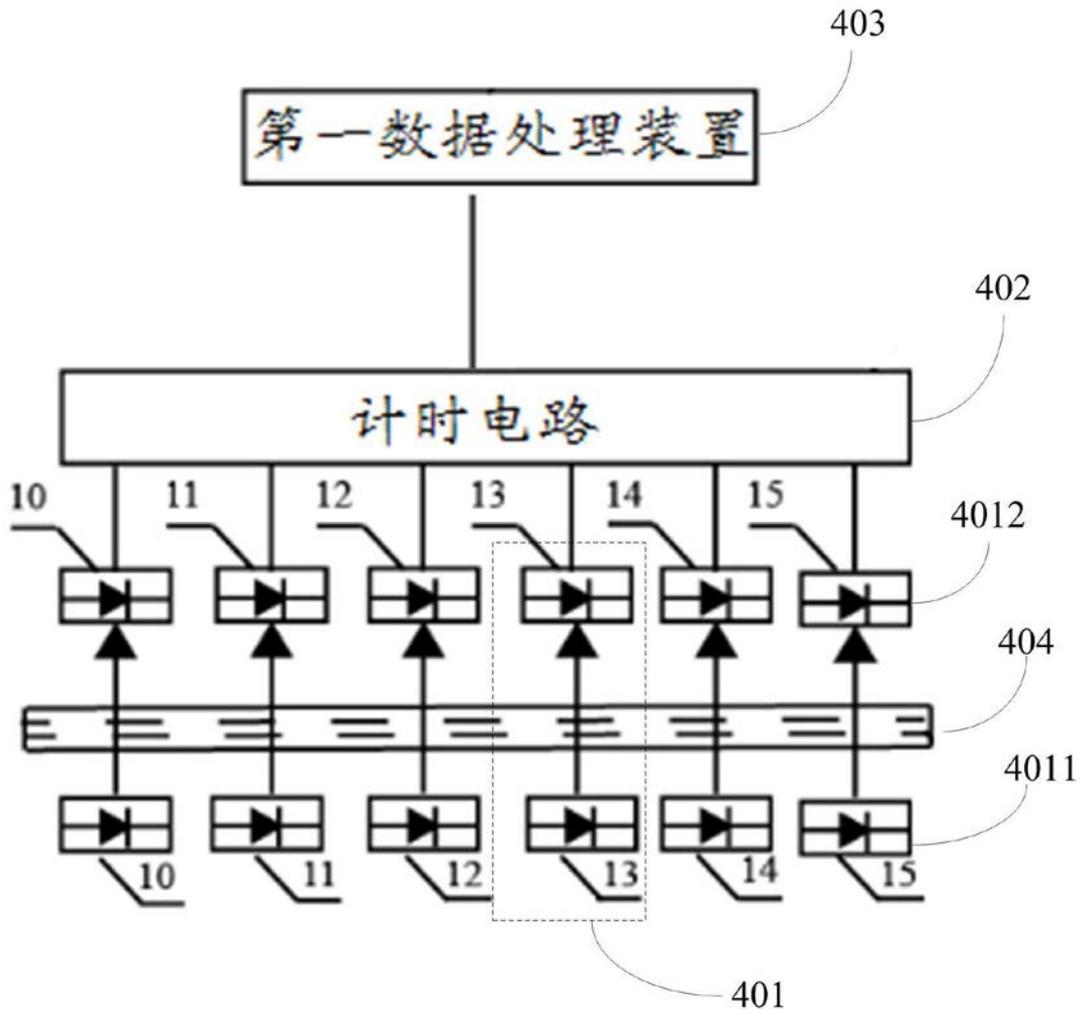


图4

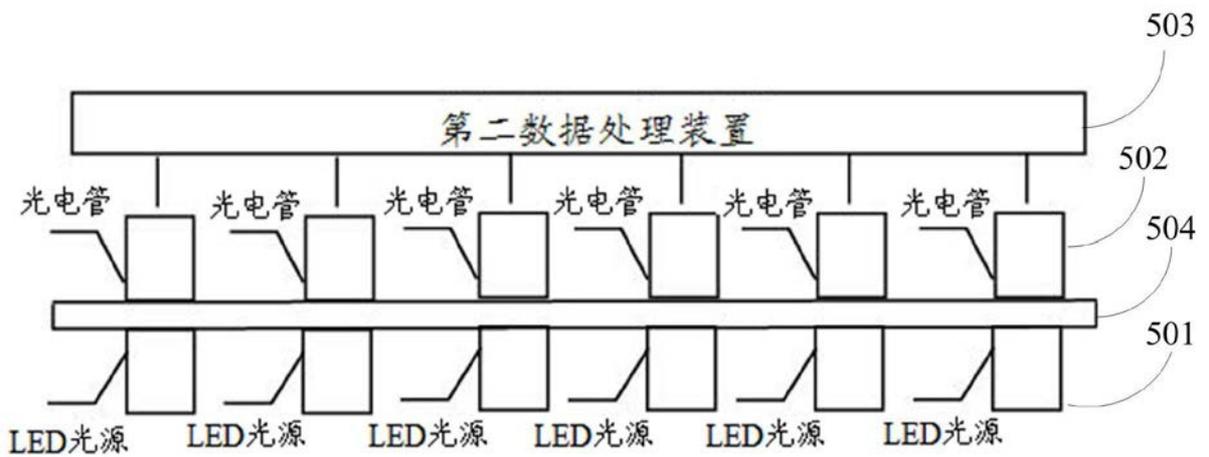


图5